

Aplikasi Semikonduktor TiO_2 dengan Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Kalsinasi sebagai *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) dengan *Dye* dari Ekstrak Buah Terung Belanda (*Solanum betaceum*)

Maula Nafi dan Diah Susanti

Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: santiche@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Penelitian mengenai *dye sensitized solar cell* dilakukan dengan *dye* dari ekstrak buah terung belanda sebagai sumber energi alternatif dari tenaga surya. *Dye sensitized solar cell* (DSSC) dibuat dengan menggunakan semikonduktor TiO_2 yang dilapiskan pada kaca konduktif *Fluorine Doped Tin Oxide* (FTO) dan dikalsinasi dengan variasi temperatur 550°C , 650°C , dan 750°C , dengan waktu tahan 60 dan 120 menit pada tiap temperaturnya. Lapisan TiO_2 pada substrat dikarakterisasi dengan menggunakan SEM dan XRD. Luas permukaan aktif diukur dengan pengujian BET. Hasil SEM menunjukkan ukuran bentuk partikel TiO_2 berupa *sphere*. Hasil XRD menunjukkan struktur kristal TiO_2 adalah *body centered tetragonal*. Luas permukaan aktif dibandingkan dengan hasil kelistrikan DSSC, yang selaras meningkat dari temperatur 550°C ke 650°C , namun menurun pada 750°C . Densitas arus dan voltase maksimum diperoleh pada variasi temperatur 650°C dengan waktu tahan 60 menit yaitu sebesar $0,356 \text{ mA/cm}^2$ dan $593,1 \text{ mV}$. Efisiensi maksimum yang diperoleh sebesar $0,469208\%$. DSSC dimodifikasi dengan menambahkan pembungkus plastik, sehingga dapat memperlambat penurunan daya yang terjadi saat DSSC bekerja.

Kata Kunci—*Dye sensitized solar cell*, temperatur kalsinasi, terung belanda, TiO_2 , waktu tahan kalsinasi.

I. PENDAHULUAN

Salah satu energi alternatif yang mempunyai potensi yang tinggi sebagai sumber energi yang dapat diperbaharui adalah sinar matahari. Suplai energi sinar matahari yang diterima bumi mencapai 3×10^{24} Joule pertahun, yang setara dengan 2×10^{17} Watt [1]. Pengembangan teknologi sel surya ini terus mengalami peningkatan, mulai dari sel surya silikon, sampai sel surya yang saat ini terus dikembangkan, yaitu *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC).

Pada DSSC, absorpsi cahaya dan separasi muatan listrik terjadi pada proses yang terpisah, tidak seperti sel surya silikon yang seluruh prosesnya melibatkan silikon saja dan tidak terpisah. Absorpsi cahaya dilakukan oleh molekul *dye* dan separasi muatan dilakukan oleh inorganik semikonduktor nanokristal yang mempunyai *band gap* lebar. Semikonduktor dengan *band gap* lebar akan memperbanyak elektron yang mengalir dari pita konduksi ke pita valensi, yang membuat ruang reaksi fotokatalis dan absorpsi oleh *dye* akan menjadi lebih banyak, sehingga spektrum menjadi lebih lebar.

Salah satu semikonduktor dengan *band gap* lebar yang sering digunakan yaitu *Titanium Dioxide* (TiO_2). TiO_2 mempunyai selisih *band gap* sebesar $3,2 \text{ eV}$. TiO_2 juga merupakan bahan yang inert, tidak berbahaya, dan murah, serta mempunyai karakteristik optik yang baik.

Selain itu, sangat penting juga dalam penggunaan bahan *dye* yang mampu menyerap spektrum cahaya yang lebar dan cocok dengan pita energi TiO_2 . Sejauh ini *dye* yang digunakan sebagai *sensitizer* dapat berupa *dye* sintesis maupun *dye* alami. *Dye* sintesis umumnya menggunakan organik logam berbasis ruthenium kompleks. *Dye* sintesis ini cukup mahal. Selain itu, *dye* berbasis ruthenium kompleks mengandung logam berat, yang tidak baik untuk lingkungan [2]. Sedangkan, *dye* alami dapat diekstrak dari bagian-bagian tumbuhan seperti daun, bunga atau buah. Ekstrak *dye* atau pigmen tumbuhan yang digunakan sebagai fotosensitizer berupa ekstrak klorofil, karoten, atau antosianin [3].

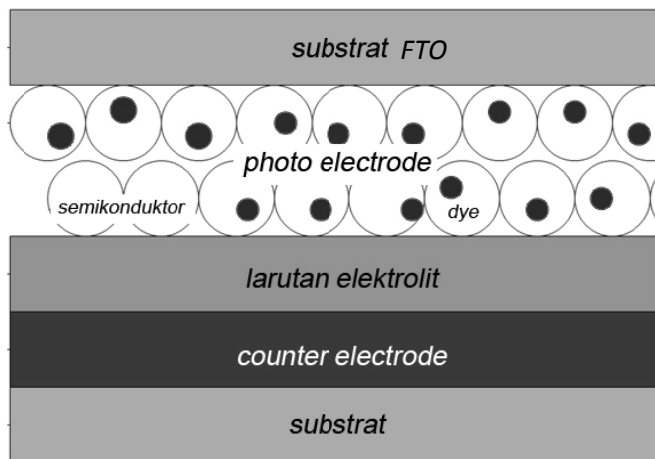
Nadeak, et. al [4] melakukan penelitian dengan menggunakan *dye* dari ekstrak buah naga, dengan variasi temperatur kalsinasi 350°C , 450°C , dan 550°C , dan waktu tahan kalsinasi 30 menit dan 60 menit pada masing-masing temperatur. Hasil dari penelitiannya menunjukkan kuat arus dan voltase maksimum didapatkan pada variasi temperatur 550°C dengan waktu tahan 60 menit, yaitu 0.307 mA/cm^2 , dan 562 mV . Efisiensi diperoleh senilai 0.038% . Namun, nilai ini masih rendah, dibandingkan penelitian Chang, et. al [5] dan Zhang, et. al [6].

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini yaitu membuat prototip DSSC dengan *dye* dari ekstrak terung belanda. Harapannya, DSSC dapat mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik, serta mempunyai nilai kelistrikan yang lebih tinggi dari penelitian sebelumnya. Diharapkan juga pada penelitian ini, DSSC yang dihasilkan dapat diaplikasikan pada perangkat elektronik sehingga dapat diketahui kinerjanya.

II. PROSEDUR EKSPERIMEN

A. Alat dan Bahan

Bahan - bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi substrat kaca *Fluorine Doped Tin Oxide* (FTO), TiO_2 (MERCK), etanol 99%, *acetonitrile*, KI, I_2 , asam asetat, aseton, lapisan Pd/Au, Aquades, dan buah terung belanda.



Gambar. 1. Skema lapisan sandwich DSSC

Peralatan yang digunakan antara lain multimeter digital, *hot plate with magnetic stirrer*, gelas beaker 25ml dan 100 ml, pipet tetes, spatula, botol tetes, *glass stirring rod*, timbangan digital, kertas tisu, kain kassa, filter, mortar, furnace, dan *spin coater*.

B. Preparasi Lapisan Oksida TiO_2

Bahan dasar dari lapisan oksida DSSC ini adalah semikonduktor TiO_2 (Merck) 3,5 gram yang dicampur dengan etanol sebanyak 15 ml di dalam *beaker glass*. Campuran ini kemudian diletakkan di atas *hot plate with magnetic stirrer* dan kemudian diaduk rata.

C. Preparasi Larutan Elektrolit

Larutan elektrolit dilakukan dengan cara melarutkan campuran antara 0,8 gram KI 0,5 M ke dalam larutan *acetonitrile* sebanyak 10 ml yang kemudian diaduk merata. Selanjutnya ditambahkan 0,127 gram I_2 ke dalam larutan tersebut sampai ketiga bahan tersebut terlarut dengan sempurna. Kemudian larutan disimpan dalam botol tertutup.

D. Preparasi Larutan Dye Ekstrak Buah Terung Belanda

Buah terung belanda digerus dengan menggunakan mortar. Setelah itu, ekstrak buah terung belanda dilarutkan dengan campuran 25 ml *aquades*, 21 ml etanol, dan 4 ml asam asetat. Ekstrak yang telah dicampurkan disaring dengan kain kassa agar diperoleh larutan *dye*-nya saja.

E. Deposisi Lapisan Oksida TiO_2

Deposisi TiO_2 pada FTO dilakukan dengan menyiapkan kaca FTO yang telah dicuci bersih dengan etanol. Selanjutnya, FTO dibersihkan dengan kertas tisu dan diletakkan di atas mesin *spin coating* dengan posisi sisi konduktif menghadap ke atas. Kemudian, pasta TiO_2 yang telah siap ditetaskan sebanyak 3 tetes ke atas kaca konduktif. *Spin coating* dilakukan dengan putaran 500 rpm selama 30 detik dan 2000 rpm selama 90 detik.

F. Proses Kalsinasi Lapisan Oksida

Proses kalsinasi ini dilakukan dengan variasi temperatur yaitu 550°C , 650°C , dan 750°C dengan waktu tahan masing-masing adalah 60 menit dan 120 menit. Hal ini dimaksudkan agar molekul oksida saling mengikat sempurna dan molekul pelarut seperti etanol dapat menguap dan membentuk

nanopori. Kemudian lapisan TiO_2 yang sudah dikalsinasi didiamkan hingga temperatur kamar.

G. Sensitisasi Lapisan Oksida

Sensitisasi lapisan oksida dilakukan dengan mencelupkan lapisan oksida pada FTO yang telah dikalsinasi ke dalam *dye* larutan buah terung belanda. Kemudian, FTO diletakkan dengan posisi lapisan oksida menghadap ke atas dan didiamkan selama dua jam. Sehingga, larutan *dye* menyerap sempurna ke dalam lapisan oksida.

H. Preparasi Counter Electrode

Counter electrode di-sputtering dengan mesin *sputter coater* untuk didapatkan penyebaran yang merata lapisan Pd/Au pada kaca FTO selama 30 menit.

I. Perakitan Dye Sensitized Solar Cell

Perakitan *Dye Sensitized Solar Cell* dapat dilakukan dengan langkah-langkah seperti di bawah ini :

1. Satu buah FTO dengan lapisan oksida TiO_2 dan *counter electrode* Pd/Au ditumpuk dengan permukaan yang saling berhadapan. Kemudian, FTO disusun membentuk sebuah struktur *sandwich*.
2. *Offset* diberikan pada ujung masing-masing elektroda sebesar 0,5 cm untuk kontak elektrik.
3. Kedua pinggir sel DSSC yang tidak diberi *offset* dijepit dengan klip agar prototipe melekat sempurna.
4. Larutan elektrolit triiodida ditetaskan 2-3 tetes di kedua ujung *offset* prototipe DSSC. Larutan elektrolit akan terserap kedalam lapisan oksida.
5. DSSC siap untuk diuji kelistrikannya.
6. Pembuatan DSSC kedua dilakukan dengan langkah 1 sampai 4, kemudian dibungkus plastik (*plastic wrapper*) sebelum dijepit.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

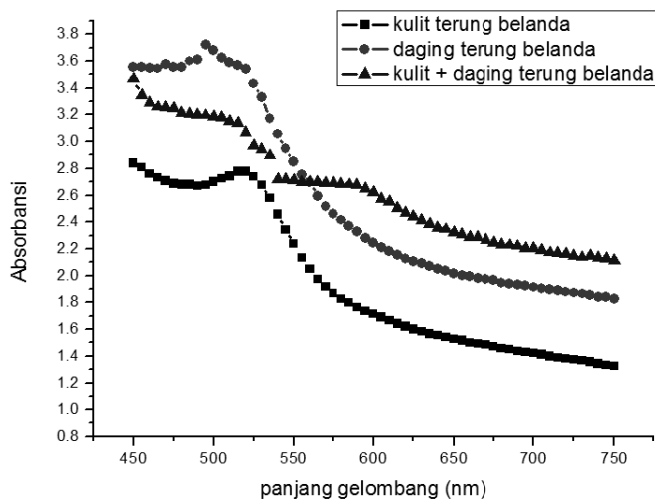
A. Pengujian UV-VIS

Pengujian UV-VIS bertujuan untuk mengetahui panjang gelombang (λ) dan nilai absorbansi (A) dari suatu larutan, dengan cara menembakkan sinar ultraviolet (UV) pada larutan. Tiga bagian terung belanda (kulit, daging, kulit+daging) dibuat larutan ekstraknya, kemudian diuji absorbansinya.

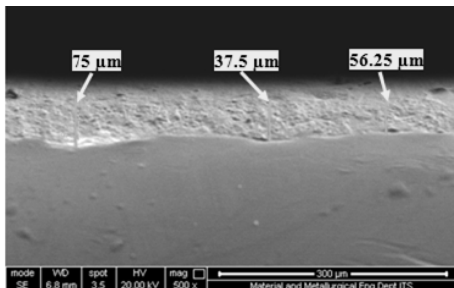
Gambar. 2. menunjukkan nilai absorbansi tertinggi adalah daging buah terung belanda, dengan panjang gelombang dan nilai absorbansi secara berturut-turut yaitu 495 nm dan 3,720.

Hal ini menunjukkan tingginya ^{FTO} ketebalan konsentrasi larutan *dye* dalam menyerap radiasi energi yang diberikan. Sehingga, semakin banyak pula foton yang bisa dieksitasi untuk dikonversikan oleh sel surya menjadi energi listrik.

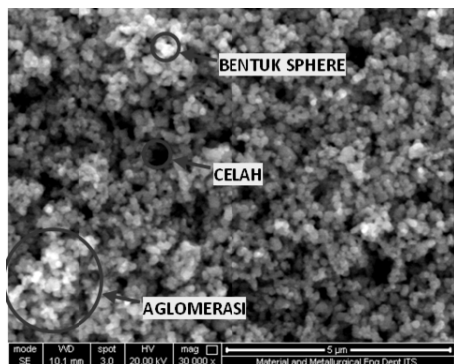
Nilai absorbansi yang dihasilkan daging buah terung belanda ini cukup tinggi bila dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, yaitu Nadeak, et. al [4] mendapatkan nilai absorbansi sebesar 3,300 dengan *dye* dari ekstrak daging buah naga merah, serta penelitian Fitria [7] yang mendapatkan nilai absorbansi sebesar 3,009 dengan *dye* dari ekstrak kulit buah naga merah.



Gambar. 2. Grafik panjang gelombang vs absorpsi buah terung belanda.



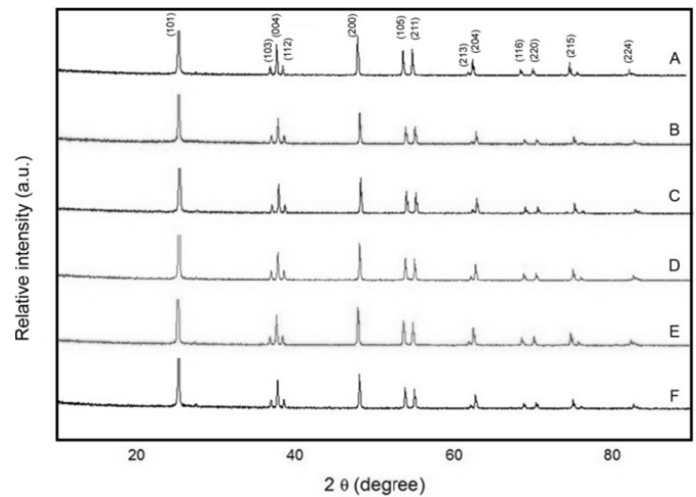
Gambar. 3. Hasil SEM *cross section* TiO₂ pada temperatur kalsinasi 650 °C dengan perbesaran 500x



Gambar.4. Hasil Uji SEM pada variasi temperatur 650°C dan waktu tahan 60 menit, dengan perbesaran 30.000x

Tabel.1.
Hasil perhitungan ukuran partikel TiO₂

Temperatur (°C)	Waktu tahan (menit)	Ukuran partikel (µm)
550	60	0,40
	120	0,29
650	60	0,28
	120	0,20
750	60	0,34
	120	0,26



Gambar. 5. Pola XRD pada lapisan TiO₂ yang telah dikalsinasi dengan variasi (A) 550°C, 60 menit; (B) 550°C, 120 menit; (C) 650°C, 60 menit; (D) 650°C, 120 menit; (E) 750°C, 60 menit; (F) 750°C, 120 menit;

B. Morfologi Lapisan TiO₂

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel dari lapisan oksida TiO₂. Gambar. 3. menunjukkan hasil SEM *cross section* dengan perbesaran 500x. Dapat dilihat bahwa tebal lapisan oksida TiO₂ berkisar antara 37,5-75 µm.

Sedangkan pada Gambar. 4. menunjukkan morfologi permukaan lapisan TiO₂. Bentuk partikel TiO₂ yaitu sferikal (*sphere*), dengan membentuk aglomerasi pada beberapa bagian. Serta dapat dilihat adanya celah pada permukaan TiO₂. Septina [8] menganalisis bahwa celah inilah yang nantinya akan mengabsorpsi molekul *dye* terung belanda. Semakin banyak celah yang terbentuk, maka akan semakin banyak larutan *dye* yang diserap. Dengan harapan, semakin banyak sinar matahari yang diserap, dan energi listrik yang dihasilkan menjadi semakin besar pula.

Ukuran partikel TiO₂ dihitung dengan cara melakukan perbandingan manual dengan skala yang tertera pada hasil SEM. Tabel. 1. menunjukkan adanya perbedaan ukuran partikel pada tiap variasinya. Variasi 650°C mempunyai ukuran partikel terkecil. Dengan semakin kecilnya ukuran partikel, maka lapisan TiO₂ dapat menyerap larutan *dye* semakin banyak [4].

C. Hasil X-Ray Diffraction

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui struktur kristal dan tingkat kristalinitas dari lapisan TiO₂ [9]. Gambar. 5. menunjukkan hasil XRD dari lapisan TiO₂ dengan variasi temperatur dan waktu tahan kalsinasi. Dapat dilihat pada gambar. 5. pemberian variasi temperatur dan waktu tahan kalsinasi tidak begitu memberikan pengaruh terhadap ukuran kristal TiO₂ karena pola XRD yang dihasilkan hampir sama secara keseluruhan pada masing-masing variasi.

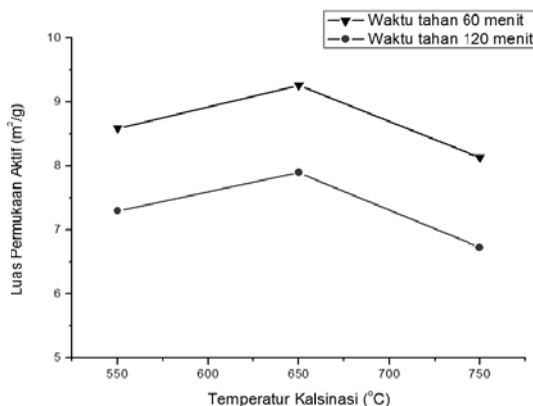
Untuk mengetahui struktur kristal TiO₂, maka dilakukan analisis menggunakan *software* PCPDFWin, dimana pola XRD pada gambar. 5. sesuai dengan kartu JCPDF nomor 84-1286. Dapat diketahui bahwa struktur kristal TiO₂ adalah *body centered tetragonal*.

Tabel.2.
Ukuran kristal TiO₂ dari berbagai variasi dihitung dari puncak tertinggi

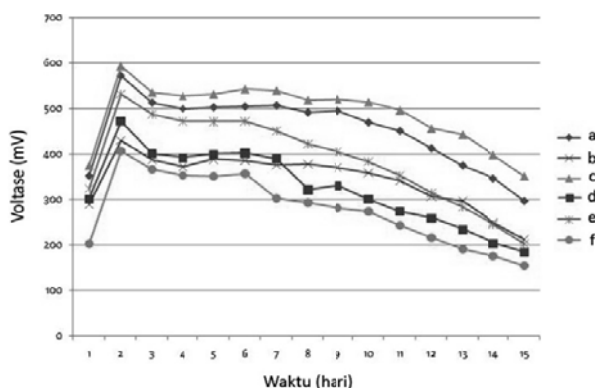
Temperatur (°C)	Waktu tahan (menit)	Ukuran Kristal (Å)
550	60	608,84
	120	608,83
650	60	608,85
	120	608,84
750	60	608,81
	120	608,77

Tabel.3.
Luas permukaan aktif pada sampel uji TiO₂

Temperatur (°C)	Waktu tahan (menit)	Luas Permukaan Aktif (m ² /g)
550	60	8,59
	120	7,30
650	60	9,26
	120	7,89
750	60	8,14
	120	6,72



Gambar. 6. Grafik hubungan antara temperatur dan waktu tahan kalsinasi terhadap luas permukaan aktif serbuk TiO₂



Gambar. 7. Grafik hubungan antara variasi temperatur dan waktu tahan kalsinasi terhadap voltase DSSC ekstrak terung belanda dengan variasi; (a) 550°C, 60 menit; (b) 550°C, 120 menit; (c) 650°C, 60 menit; (d) 650°C, 120 menit; (e) 750°C, 60 menit; (f) 750°C, 120 menit

Ukuran kristal TiO₂ pada setiap variabel dihitung untuk mengetahui tingkat kristalinitas tiap variabel. Ukuran kristal dihitung menggunakan persamaan Scherrer sebagai berikut:

$$D = \frac{0.9 \lambda}{B \cos \theta} \quad (1)$$

dimana:

D = ukuran kristal (Å),
 λ = panjang gelombang radiasi (Å),
 B = Full Width at Half Maximum (rad),
 θ = sudut Bragg (°)

Tabel. 2. menunjukkan hasil perhitungan ukuran kristal pada tiap-tiap variasi. Dapat dilihat bahwa ukuran kristal TiO₂ pada setiap variasi hampir sama, yaitu sekitar 608,8 Å. Namun ukuran kristal terbesar yaitu pada variasi 650°C dan waktu tahan 60 menit.

Kesamaan nilai ukuran kristal ini disebabkan karena TiO₂ yang digunakan yaitu dibuat oleh pabrik Merck, sehingga cukup sulit untuk mengubah ukuran kristal yang sudah tetap dengan pemberian perlakuan panas seperti kalsinasi [7].

D. Hasil Breuner Emmet Teller

Pengujian Breuner Emmet Teller (BET) dilakukan untuk mengetahui luas permukaan aktif dari serbuk TiO₂. Tabel. 3. dan gambar. 6. menunjukkan hasil uji BET serbuk TiO₂ pada setiap variasi. Pada variasi temperatur 650°C dan waktu tahan 60 menit, mempunyai nilai luas permukaan aktif yang paling besar. Nilai ini akan dibandingkan dengan hasil performa kelistrikan DSSC.

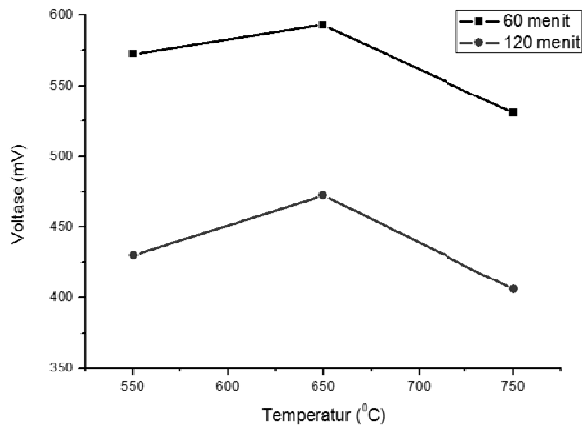
E. Pengujian Voltase

Pengujian voltase dilakukan dengan cara memapar DSSC pada sinar matahari dan dihubungkan dengan multimeter digital. Pengujian dilakukan selama lima belas hari. Gambar. 7. menunjukkan hasil uji voltase pada DSSC.

Hasil uji voltase menunjukkan bahwa pada hari pertama, voltase masih rendah, dikarenakan larutan dye belum sepenuhnya terserap pada lapisan TiO₂. Begitu pula yang terjadi pada larutan elektrolit. Sedangkan dari hari kedua hingga hari kelima belas. Voltase terus menurun karena DSSC dipapar sinar matahari, sehingga disinyalir terjadinya penguapan pada larutan elektrolit ataupun larutan dye [10]. Hal ini yang menyebabkan menurunnya nilai voltase hingga hari kelima belas.

Gambar. 8. menunjukkan grafik perbandingan voltase tertinggi dari masing-masing variasi. Dapat terlihat bahwa voltase tertinggi diperoleh pada variasi 650°C, 60 menit, yaitu senilai 593,1 mV.

Gambar. 6. dan gambar. 8. mempunyai trend yang sama. Hal ini membuktikan bahwa nilai voltase DSSC yang dihasilkan berbanding lurus dengan luas permukaan aktifnya. Selain itu, dapat dikatakan juga bahwa performa DSSC dari temperatur 550°C terus meningkat hingga 650°C, lalu menurun pada 750°C. Artinya, performa DSSC terus meningkat seiring naiknya variasi temperatur kalsinasi. Namun, temperatur 650°C adalah temperatur optimumnya, sehingga performa DSSC menurun pada temperatur 750°C.



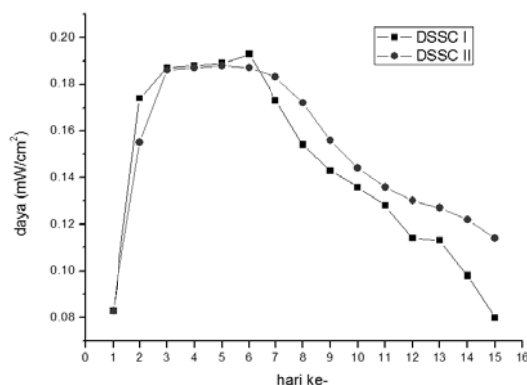
Gambar 8. Grafik perbandingan voltase DSSC terhadap variasi temperatur kalsinasi

Tabel 4.
Efisiensi DSSC

Temperatur (°C)	Waktu Tahan (menit)	Efisiensi (%)
550	60	0,0408
	120	0,0211
650	60	0,0469
	120	0,0269
750	60	0,0277
	120	0,0164

Tabel 5.
Perbandingan daya DSSC I dan DSSC II selama 15 hari

Hari ke-	Daya DSSC I (mW/cm ²)	Daya DSSC II (mW/cm ²)
1	0,083	0,083
2	0,174	0,155
3	0,187	0,186
4	0,188	0,187
5	0,189	0,188
6	0,193	0,187
7	0,173	0,183
8	0,154	0,172
9	0,143	0,156
10	0,136	0,144
11	0,128	0,136
12	0,114	0,130
13	0,113	0,127
14	0,098	0,122
15	0,080	0,114



Gambar 9. Perbandingan daya DSSC I dan DSSC II

F. Perhitungan Efisiensi

Efisiensi yaitu persentase perbandingan daya yang dihasilkan DSSC dibandingkan dengan daya yang dihasilkan matahari untuk menyinari bumi. Perhitungan efisiensi menggunakan persamaan (2) dan (3) di bawah ini.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{input}} \times 100\% \quad (2)$$

$$P_{max} = V_{max} \times J_{max} \quad (3)$$

Dimana:

- η : efisiensi (%)
- P_{max} : daya maksimum DSSC (mW/cm²)
- V_{max} : voltase maksimum DSSC (Volt)
- J_{max} : densitas arus maksimum DSSC (mA/cm²)
- P_{input} : daya sinar matahari di Surabaya (mW/cm²)

Nilai P_{input} didapatkan daya sinar matahari yang menyinari Indonesia bagian barat (termasuk Surabaya) yaitu senilai 450 mW/cm².

Tabel 4. menunjukkan nilai efisiensi DSSC yang didapatkan dari setiap variasi temperatur dan waktu tahan. Dapat dilihat bahwa DSSC yang mempunyai nilai efisiensi tertinggi yaitu DSSC dengan variasi temperatur 650°C dan waktu tahan 60 menit, yaitu 0,0469%

Nilai efisiensi yang dicapai pada penelitian kali ini lebih tinggi daripada penelitian sebelumnya, yaitu Nadeak, et. al [4] yang mempunyai nilai efisiensi tertinggi 0,0383%.

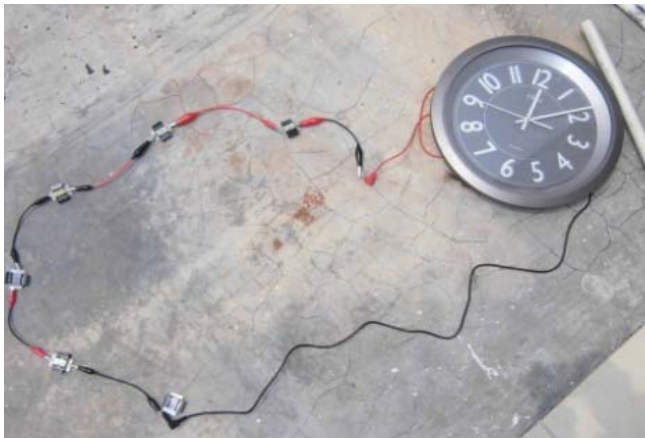
G. Modifikasi DSSC

DSSC yang telah dibuat kemudian dimodifikasi, dengan cara pemberian pembungkus plastik (*plastic wrapper*) pada permukaan DSSC setelah penyusunan struktur *sandwich*. Hal ini sesuai berdasarkan saran dari penelitian Nadeak, et. al [4] yaitu memberikan wadah atau pembungkus untuk mencegah penguapan larutan *dye* ataupun larutan elektrolit pada saat DSSC bekerja. Sehingga pada variasi terbaik DSSC, yaitu 650°C, 60 menit, dibuat DSSC II, dengan memberikan pembungkus plastik. Pada tabel 5. dan gambar 9. menunjukkan perbandingan daya yang dihasilkan DSSC I dan DSSC II selama lima belas hari.

Dapat dilihat pada tabel 5. dan gambar 9. bahwa DSSC I memang mempunyai nilai daya yang tinggi pada awalnya, namun setelah hari keenam, mulai terjadi penurunan daya. DSSC I menurun drastis, namun DSSC II mengalami penurunan daya yang lambat. Sehingga dapat dikatakan bahwa pemberian *plastic wrapper* menghasilkan daya yang kurang tinggi, namun dapat memperlambat terjadinya penurunan daya.

H. Aplikasi DSSC

DSSC II diaplikasikan dengan cara membuat rangkaian listrik seri dengan menggunakan 6 buah prototip DSSC, dan dihubungkan pada sebuah jam dinding. Sebelum diuji, voltase tiap-tiap DSSC diukur menggunakan multimeter digital, dan dihasilkan *range* voltase ± 500 mV. Sehingga jika dirangkai seri, maka voltasenya diperkirakan sekitar ± 3 V. Namun setelah dirangkai, multimeter digital menunjukkan nilai 2,84 V. Hal ini menunjukkan adanya



Gambar. 10. Percobaan aplikasi DSSC pada jam dinding

hambatan yang terbentuk, dari kabel yang menghubungkan setiap DSSC, sehingga nilai voltase tidak sesuai dengan yang dihitung. Gambar. 10. menunjukkan ilustrasi percobaan rangkaian DSSC II dengan jam dinding.

Percobaan dilakukan pada pukul 12.00 siang. Setelah DSSC dan jam dirangkai, jarum detik jam dinding bergerak, sehingga dapat dikatakan DSSC yang telah dibuat dapat mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik.

IV. KESIMPULAN

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dapat difabrikasi menggunakan semikonduktor TiO_2 dan *dye* dari ekstrak terung belanda. DSSC dapat mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Voltase maksimum yang dihasilkan yaitu 593,1 mV dan efisiensi 0,0462%.

Variasi temperatur 650°C merupakan temperatur optimum untuk menghasilkan performa DSSC yang maksimal. Waktu tahan kalsinasi 120 menit dinilai terlalu lama karena hasil voltase dan efisiensi dari variasi waktu tersebut mempunyai nilai yang lebih rendah daripada waktu tahan 60 menit.

DSSC yang dimodifikasi dengan menambahkan *plastic wrapper* pada permukaannya terbukti mampu mengurangi penguapan, sehingga dapat memperlambat laju penurunan daya pada saat DSSC bekerja.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Rahman, "Pengaruh tingkat kekristalan TiO_2 pada tegangan terbuka sel surya tersensitisasi pewarna perbasis ZnO-TiO_2 ," Departemen Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia (2008).
- [2] K. Wongcharee, V. Meeyoo, and S. Chavadej, "Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 91 (2007) 566-571.
- [3] A. Maddu, M. Zuhri, dan Irmansyah, "Penggunaan ekstrak antosianin kol merah sebagai fotosensitizer pada sel surya TiO_2 nanokristal tersensitisasi dye," *Makara, Teknologi*, Vol 11, No. 2 (Nov., 2007) 78-84
- [4] S. M. R. Nadeak, dan D. Susanti. "Variasi temperatur dan waktu tahan kalsinasi terhadap unjuk kerja semikonduktor TiO_2 sebagai dye sensitized solar cell (DSSC) dengan dye dari ekstrak buah naga merah," Tugas Akhir S1, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS, Surabaya, Indonesia (2012).

- [5] H. Chang, H. M. Wu, T. L. Chen, K. D. Huang, C. S. Jwo, dan Y. J. Lo, "Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from spinach and ipomoea," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 495, No. 2 (2010) 606-610.
- [6] Y. Zhang, L. Wang, Liu Zhai, D. Wang Fan dan X. Lin, "Synthesis Zn-doped TiO_2 microspheres with enhanced photovoltaic performance and application for dye -sensitized solar cell," *ElectrochimicaActa*, Vol. 56 (2011) 6517-6523.
- [7] J. Fitiria, A. Ishori, F. R. Abadi, S. M. R. Nadeak, "Studi pemanfaatan kulit buah naga sebagai materi sel surya dengan metode dye sensitized solar cell," Laporan PKMP, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS, Surabaya, Indonesia (2012).
- [8] W. Septina, D. Fajarisandi, M. Aditia, "Pembuatan prototip solar cell murah dengan bahan organik-inorganik (dye sensitized solar cell)," Laporan Akhir Penelitian Bidang Energi, Penghargaan PT. Rekayasa Industri (2007).
- [9] L. Pancaningtyas, S. Akhlus, 2008, "Peranan elektrolit pada performa sel surya pewarna tersensitisasi (SSPT)," Laboratorium Kimia Fisik FMIPA ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
- [10] W. Handini, "Performa sel surya tersensitisasi zat pewarna (DSSC) berbasis ZnO dengan variasi tingkat pengisian dan besar kristalit TiO_2 ," Skripsi S1, Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia, Jakarta, Indonesia (2008).